当前北斗导航星座现状仿真分析与定量评估*

蒋虎[1,2]，邓雷[1,2]，余金培[1,2]

（1.中国科学院微小卫星创新研究院,上海 201203;2.上海微小卫星工程中心,上海 201203）

摘要：北斗卫星导航系统是我国的重要基础设施建设项目之一。随着北斗三号系统建设进入收尾阶段，对于当前的北斗卫星导航系统的阶段性的导航性能状况，许多导航用户依然十分关注。文中就是针对截至 2019 年 5 月份已经在轨运行的北斗导航星座，利用卫星工具包软件 STK 开展了北斗导航星座现状仿真分析与定量计算。文中选取了国内有地理位置代表性的测站作为考察对象，给出了这些区域的北斗导航性能的仿真结果，同时还以 700km 高度的低地球轨道太阳同步卫星 LEO 所在区域为考察对象，给出了高动态移动用户情况下北斗导航性能的仿真结果。仿真结果表明：在中国境内区域，当前北斗系统已经可以提供优于 10 米的定位服务，具备为国家安全活动保障提供高精度的位置信息服务能力；当前北斗导航系统可以满足空间科学先导专项飞行器对导航位置的精度需求；本文仿真结果可供北斗导航系统开展全面测试提供数据参考。

关键词：北斗卫星导航系统；星座；仿真；定量评估；导航精度衰减因子

中图分类号：P228.4

1 引言

北斗卫星导航系统是独立运行的卫星导航系统之一，是我国的重要基础设施之一；北斗卫星导航试验系统也被称作北斗一号，它使用的是有源定位，由三颗离地约 36000 公里高的北斗卫星导航试验系统地球同步卫星组成，两颗为工作卫星，分别定点在东经 80°、东经 140°上空，一颗为在轨备份卫星，定点在东经 110.5°，2000 年年底，建成北斗一号系统，向中国用户提供区域导航服务,北斗一号卫星导航定位系统可向用户提供全天候的即时定位服务,校准精度为 20 米,未校准精度 100 米。北斗二号卫星导航系统空间段由 14 颗卫星组成,2012 年年底，建成北斗二号系统，向亚太地区提供两种服务方式，即开放服务和授权服务。开放服务是在亚太地区免费提供定位、测速和授时服务，定位精度为 10 米左右，授时精度为 50 纳秒，测速精度 0. 2 米/秒。授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息。北斗三号卫星导航系统空间段由 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星组成，计划在 2020 年前后，建成北斗全球卫星导航系统，向全球提供两种服务方式，即开放服务和授权服务。开放服务是在服务区中免费提供定位、测速和授时服务，定位精度为 10 米，授时精度为 10 纳秒，测速精度 0.2 米/秒。授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息。2035 年前还将建设完善更加泛在、更加融合、更加智能的综合时空体系[1]。经历了前期的关键技术攻关阶段，近几年来中国的北斗卫星导航系统工程取得了突破性的进展，截至 2019 年 5 月 17 日，北斗卫星导航系统共有 45 颗卫星在轨运行[2]。国内外导航系统用户对北斗系统的导航服务性能也很感兴趣[3,4]，尤其是国内用户，比如国内空间飞行器设计时，为了提高飞行器位置信息获取的可靠性，航天系统设计师往往会为空间飞行器量身订制 GPS、北斗双模接收机或 GNSS 多模接收

---

*基金项目：国家重点研发计划（2018YFB0504301）资助.

作者简介：蒋虎，男，研究员，研究方向：科学卫星总体技术.Email：hh9999ca@163.com

机，有些空间飞行器还专门设计了基于北斗短报文通信的接收终端等；在北斗全球卫星导航系统提供有效服务之前，国内空间系统设计往往采取单模导航接收机+注入轨道数据作为近地空间飞行器获取自身空间位置信息的主要模式之一，或者通过 USB 测定轨方式来提供飞行器的位置信息服务[5]。中国科学院十三.五空间科学先导专项的部分飞行器在系统设计时考虑了北斗应用模式拓展，它们将是北斗卫星导航系统的潜在空间用户；对于这些北斗系统的空间用户，对北斗系统的现阶段导航性能十分关切。本文基于目前在轨北斗导航卫星轨道数据（约 40 颗有效卫星），构建了当前真实情况下北斗导航星座的运行场景，针对地面导航用户、太空导航用户，分别仿真计算了基于当前北斗导航系统（当下的空间段卫星布局）情况下的导航精度衰减因子[6,7]，此结果可以作为输入约束，来进一步验证中科院空间科学先导专项飞行器的导航应用终端设计的有效性。



图 1 规划中的北斗全球卫星导航系统卫星空间分布情况[8]

Fig.1 Planned deployment for BeiDou global navigation system

2 星座构建与导航性能仿真

为了满足北斗潜在用户开展地面仿真验证的需求，这里我们利用了国际上公开的空间目标轨道数据库[9]，下载了当前北斗导航系统的所有在轨卫星轨道数据，并利用 Satellite Tool Kits (STK)软件构建了当前北斗卫星导航星座的仿真场景。基于仿真场景，选取了国内一些重点地区的测站作为参考点，开展了这些地区的北斗导航用户的导航性能仿真分析与定量计算。所选取的国内主要站点分布如图 2 所示。本文仿真所使用的在轨卫星星下点分布见图 3。

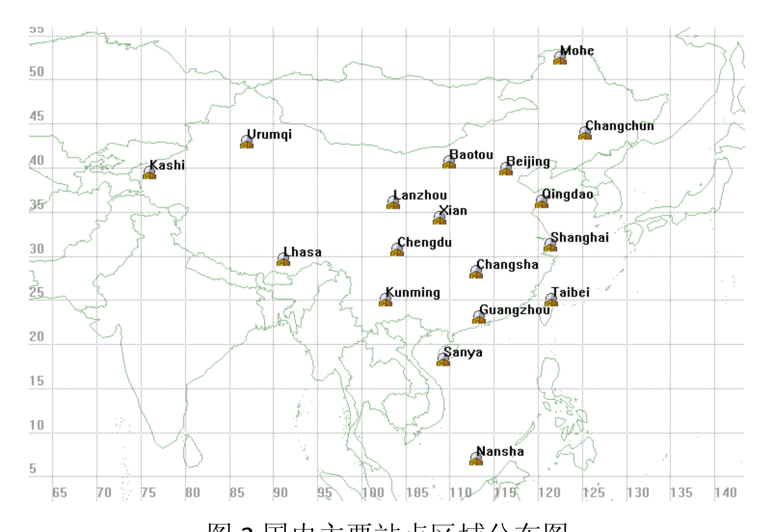


图 2 国内主要站点区域分布图

Fig.2 Distribution of some typical sites or areas

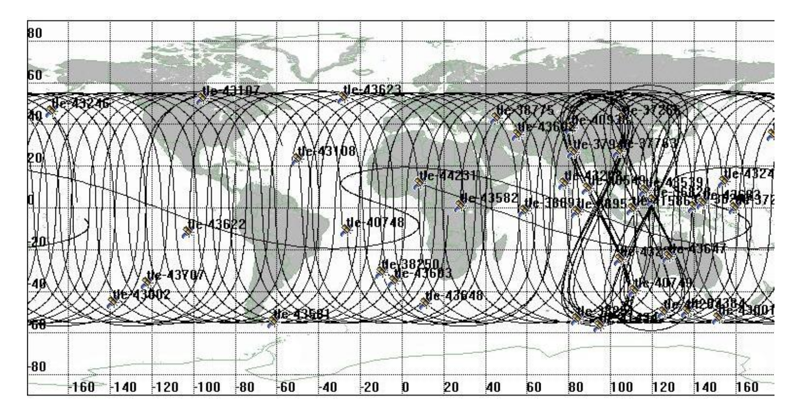


图 3 截至 2019 年 5 月 17 日在轨北斗卫星星下点分布图

Fig.3 Footprints of in-orbit BeiDou satellites as of May 17,2019

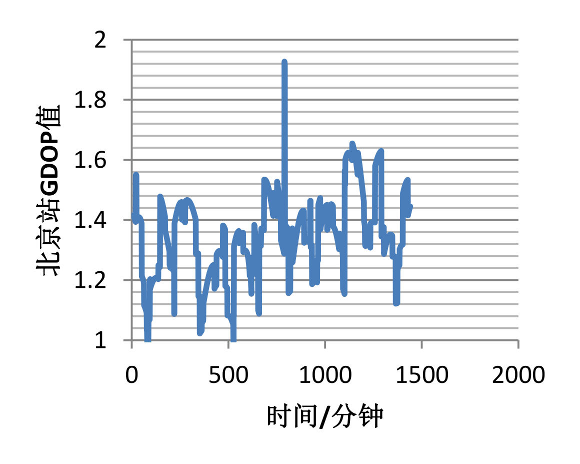
针对图 2 所列的站点及图 3 给出的在轨北斗卫星，考虑了地面最低仰角为 5 度情况下，利用我们所构建的北斗星座场景，对所感兴趣的 19 个目标用户的导航性能进行了定量计算。仿真结果见表 1 所列。

表 1 5 度地面仰角情况下国内各主要城市或地区的 GDOP 仿真结果

Table 1 Simulation of GDOP for users in main cities or areas within China in case of cutoff elevation angle of 5 degrees

城市或地区	HDOP 均值	VDOP 均值	PDOP 均值	TDOP 均值	GDOP 均值	GDOP 最大值
包头	0.679759	0.953501	1.171671	0.672728	1.351561	1.972919
北京	0.677357	0.952953	1.169816	0.671464	1.349293	1.921581
长春	0.678476	0.935080	1.156052	0.648619	1.326442	1.742329
长沙	0.658935	0.958027	1.164534	0.685632	1.351739	1.828590
成都	0.668223	0.953629	1.166587	0.682395	1.351876	1.848697
南沙	0.584356	0.904923	1.077883	0.624348	1.245740	1.515335
广州	0.633348	0.922616	1.121387	0.656205	1.299555	1.814973
喀什	0.742891	0.968051	1.222630	0.692138	1.406029	2.009052
昆明	0.646868	0.928127	1.133901	0.661685	1.313165	1.982527
兰州	0.679511	0.953072	1.171933	0.678792	1.354693	1.951513
拉萨	0.682963	0.926067	1.153328	0.666403	1.332583	2.158882
青岛	0.673242	0.953795	1.168221	0.675409	1.349878	2.231887
上海	0.663940	0.949570	1.159857	0.676344	1.343115	2.206247
台北	0.645971	0.931845	1.135689	0.665163	1.316541	1.960458
西安	0.673700	0.959524	1.173721	0.684319	1.359009	1.937460
漠河	0.654624	0.879971	1.098318	0.577997	1.242067	1.750510
三亚	0.609524	0.901035	1.090260	0.632252	1.260512	1.716197
乌鲁木齐	0.735260	0.993934	1.237730	0.714205	1.429944	1.914229
LEO 飞行器	0.502524	0.560173	0.753600	0.263963	0.798954	1.137430

从表 1 可以看出，各测站的 GDOP 呈现如下特点：a）测站纬度越低，GDOP 相对较小，这主要是由于北斗星座中存在多颗 GEO 卫星（倾角 0 度）而引起的，即北斗导航卫星星座对低纬度地区覆盖较好；b）所考查的地区中，各测站 GDOP 最大值不超过 2.3；c）所考察的 LEO 卫星是 700km 高度的太阳同步轨道卫星，该卫星的 GDOP 仿真结果是：平均值 0.798954，最大值 1.137430，可见 LEO 卫星的导航精度衰减因子相对较小，该结果有利于空间科学先导专项飞行器的导航应用终端发挥较优的性能。



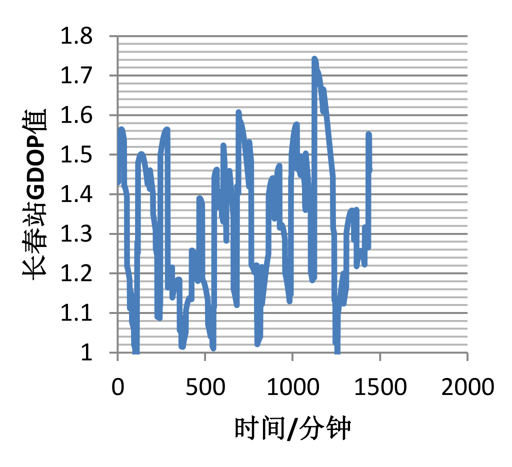



图 4 北京站一天内 GDOP 变化情况

图 5 长春站一天内 GDOP 变化情况

Fig.4 Daily variation in GDOP for Beijing

Fig.5 Daily variation in GDOP for Changchun

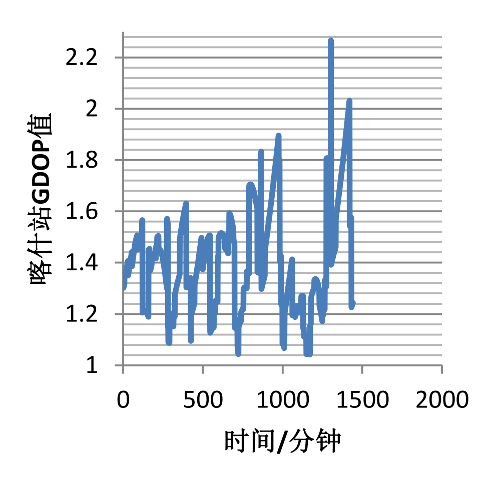


图 6 喀什站一天内 GDOP 变化情况

Fig.6 Daily variation in GDOP for Kashi

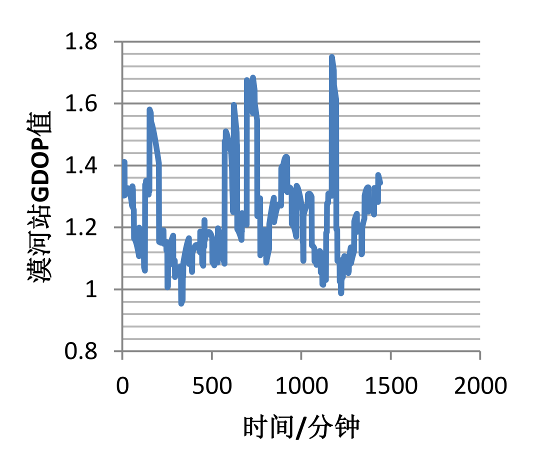


图 7 漠河站一天内 GDOP 变化情况

Fig.7 Daily variation in GDOP for Mohe

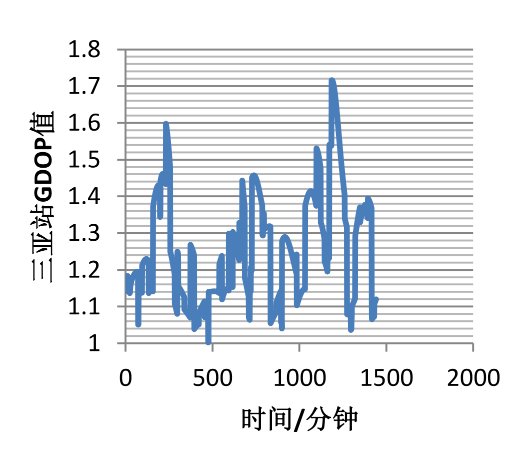


图 8 三亚站一天内 GDOP 变化情况

Fig.8 Daily variation in GDOP for Sanya

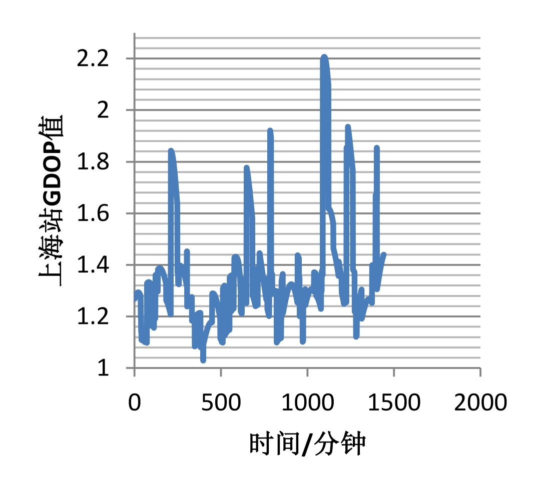


图 9 上海站一天内 GDOP 变化情况

Fig.9 Daily variation in GDOP for Shanghai

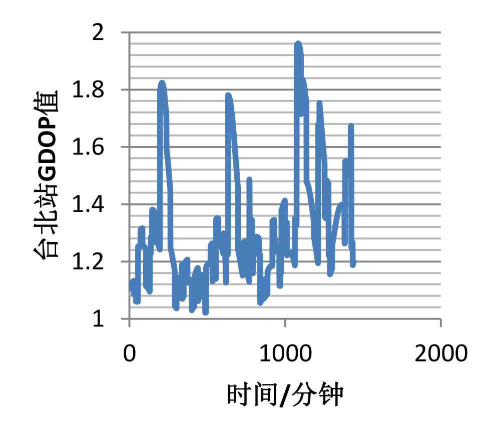


图 10 台北站一天内 GDOP 变化情况

Fig.10 Daily variation in GDOP for Taibei

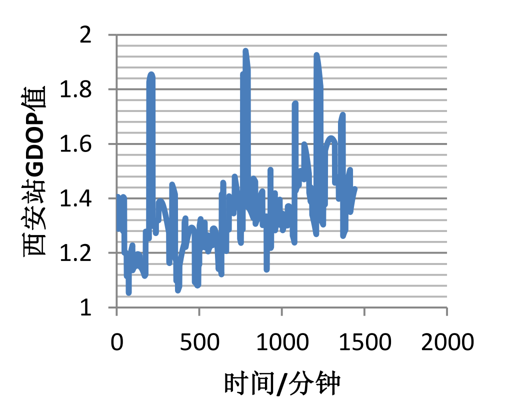
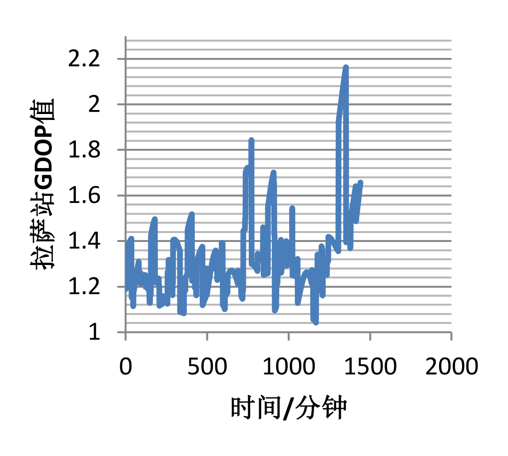


图 11 西安站一天内 GDOP 变化情况

Fig.11 Daily variation in GDOP for Xi’an



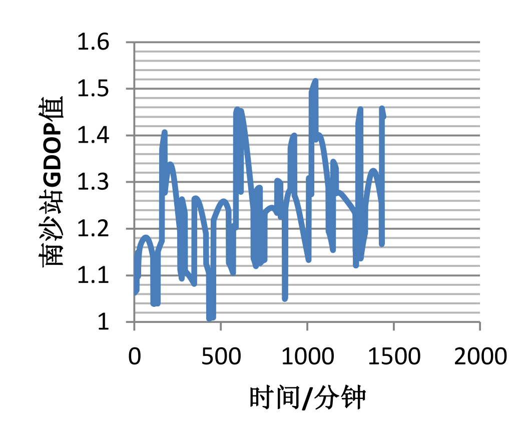


图 12 拉萨站一天内 GDOP 变化情况

Fig.12 Daily variation in GDOP for lhasa

图 13 南沙站一天内 GDOP 变化情况

Fig.13 Daily variation in GDOP for Nansha

图 4~图 13 分别给出了一部部分中国境内典型地理位置的地面测站一天内 GDOP 变化曲线，一分钟一个采样点，从图中可以看出，当前北斗卫星导航系统可以为我国国境内提供 GDOP 不大于 2.3 的导航定位服务。根据北斗公开服务性能规范，95%置信度下，忽略单频电离层延迟模型误差情况下，IGSO，MEO，GEO 卫星的地面用户测距误差 URE 均不大于 2.5m，以此推断，本文所涉及的各测站所在区域，当前的北斗卫星导航系统可以提供位置精度为 5.75 米左右的定位服务。

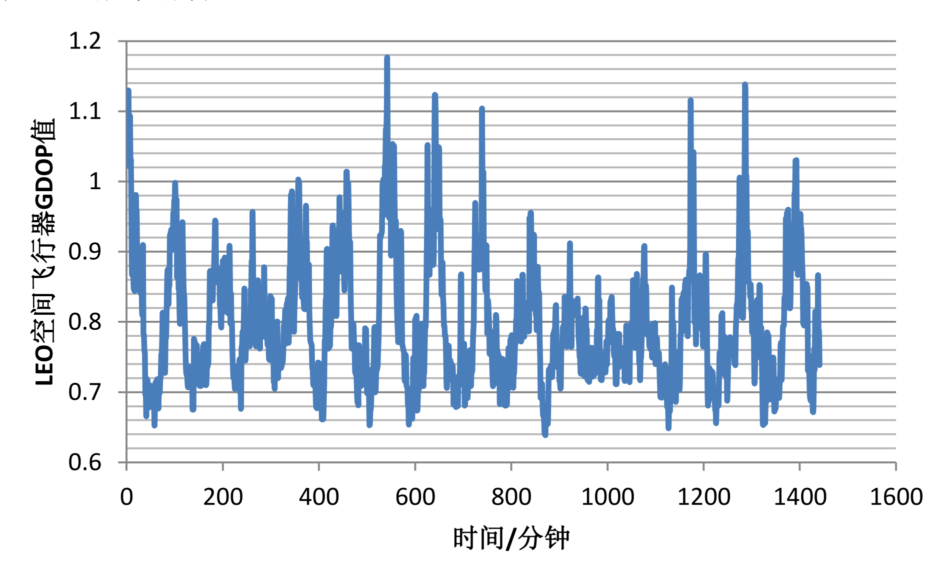


图 14 LEO 空间飞行器一天内 GDOP 变化情况

Fig.14 Daily variation in GDOP for LEO spacecraft in space

若北斗系统的空间用户空间信号精度约为 1m，以此推断，针对 LEO 用户，当前的北斗卫星导航系统可以提供位置精度为 1.14 米左右的定位服务，该精度能够满足空间科学先导专项科学任务对 LEO 卫星位置精度的需求。借助北斗卫星导航系统定位服务，再加上 GPS 定位服务，空间科学先导专项的空间系统设计时将在飞行器位置信息获取方面具备冗余能力，有效增加了空间系统使用的可靠度，可以降低空间系统对注入轨道数据的需求，从而减少了飞行器长管期间地面人工干预的频度。

3 结论

基于目前在轨北斗导航卫星轨道数据，通过构建当前真实情况下北斗卫星导航星座的运行场

景，对地面导航用户、LEO 太空导航用户的导航精度衰减因子仿真结果表明：当前北斗导航系统可以满足空间科学先导专项飞行器对导航位置的精度需求；同时，在中国国境以内区域，当前北斗系统已经可以提供优于 10 米的定位服务，具备为国家安全活动保障提供高精度的位置信息服务能力。

参考文献:

[1]中国卫星导航系统管理办公室主办.北斗卫星导航系统介绍，[EB/OL].[20190620].http://www.beidou.gov.cn/xt/xtjs/201710/t20171011_280.html.

[2]国家航天局.第 45 颗北斗导航卫星成功发射，[EB/OL].(20190520)[20190620].http://www.cnsa.gov.cn/n6758824/n6759009/n6759043/n6759069/c6806347/content.html.

[3]卢伟俊，万庆涛，范江涛，等.北斗/GPS 双频静态伪距单点定位结果对比分析[J].天文研究与技术，2016，13（4）:433-440.

Lu Weijun，Wan Qingtao，Fan Jiangtao, et al. A comparative study of static pseudorange single point positioning by double frequency between BDS and GPS [J] . Astronomical Research & Technology，2016，13(4):433-440.

[4]傅圣友，李圣明，王兆瑞.基于CAPS，BDS 和GPS 的组合卫星定位精度分析[J].天文研究与技术，2018,15(4):397-403.

Fu Shengyou，Li Shengming，Wang Zhaorui. Analysis of combined positioning accuracy based on CAPS，BDS and GPS [J] . Astronomical Research & Technology，2018,15(4):397-403.

[5]许建忠,王祖林,郭旭静,等. 统一 S 波段卫星测控系统的仿真实现[J].航天控制，2009,27（5）：65-69.

XU Jianzhong,WANG Zulin,GUO Xujing,et al. The USB TT&C System and Realization of Simulation [J] . Aerospace Control,2009,27（5）：65-69.

[6]Nalineekumari A; Sasibhushana R G; Kumar N A;GDOP Analysis with Optimal Satellites Using GA for Southern Region of Indian Subcontinent，Procedia Computer Science，2018：303-308.

[7]王菁,刘战合,王晓璐,王正鹤.GPS/BDS 星座导航性能仿真分析[J].电子设计工程,2018，26（17）：162-166.

WANG Jing，LIU Zhan-he，WANG Xiao-lu. Simulation and analysis of navigation performance for BDS/GPS constellation [J]. Electronic Design Engineering，2018，26（17）：162-166

[8]中国卫星导航系统管理办公室主办.北斗卫星导航系统介绍，[EB/OL].[20190621].http://www.beidou.gov.cn/.

[9]Kelso T S. NORAD Two-Line Element Sets Current Data, [EB/OL].(20190515)[20190620].http://celestrak.com/NORAD/elements/.

Simulation of current BeiDou navigation constellation and its quantitative assessment

Jiang Hu[1,2], Deng Lei[1,2], Y Jinpei[1,2]

(1.Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201203,China;

2.Innovation Academy of Microsatellites, CAS, Shanghai 201203,China)

Abstract: BeiDou satellite navigation system is one of the basic infrastructure projects in China. The deployment of the third generation of satellites navigation system of China will be completed

by the year of 2020 or so. Before finally completing the task, the potential users of BDS are anger to know the present characteristics of the BDS. As of May 17, 2019, there are 45 satellites orbiting in space, of which the BDS has been composed， however only about 40 satellites are valid. Some geographically typical sites are chosen to assess the characteristics of the current BDS. One LEO satellite in sun-synchronous orbit，which is assumed to be deployed in altitude of 700km above the Earth surface, is included to simulate the performance of the BDS in case of user at extremely high speed. The simulations have shown that the current in-orbit BDS has the capabilities of providing service with navigation accuracy of better than 10 meters within China territory; and current space deployments of BDS could provide reliable positioning for LEO satellite, too. Space science missions, advocated by the Chinese Academy of China, can benefited from current BDS with sufficiently positioning accuracy. The simulations have provided a valuable dataset for future comprehensive testing of BDS.

Key words: BeiDou satellite navigation system; constellation; simulation; quantitative assessment; GDOP